

광물자원탐사를 위한 거도광산지역의 산화형 스카른 금광상모델 예비연구

김의준¹ · 박맹언² · 성규열^{3*}

¹한국지질자원연구원, ²부경대학교 환경지질과학과, ³한국해양대학교 에너지자원공학과

Preliminary Study of Oxidized Au skarn Model in the Geodo Mine Area to Mineral Exploration

Eui-Jun Kim¹, Maeng-Eon Park² and Kyul-Youl Sung^{3*}

¹Geological Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Department of Environmental Geosciences, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³Department of Energy and Resources Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

The Geodo mine area, had been developed for Fe and Cu ores since 1963 and abandoned in recent decades, is located in the central part of the Taebaeksan mineralized district. This area comprises of the Jangsan, Myobong, Pungchon, Hwajeol, Dongjeom, and Dumugol Formations in ascending stratigraphic order. These Formations were intruded by the Cretaceous Eopyeong granitoids that appears to produce the Geodo skarn. Their compositions are relatively oxidized quartz monzodiorite to granodiorite (magnetite series, $Fe_2O_3/FeO=0.3\sim1.1$). Mineralizations related skarn deposit occur in the Myobong, Pungchon, and Hwajeol Formations. The proximal skarn is zoned from andraditic garnet ($Ad_{44-95}Gr_{1-53}$) predominant adjacent to the Eopyeong granitoids to diopsidic pyroxene ($Hd_{10-100}Di_{0-89}$) predominant away from the one. The differential proportion of garnet and pyroxene is generated by water/rock ratio and their source, such as magmatic and meteoric water. This is useful tool for assessment the overall oxidation state of the entire skarn system. Gold occurs in proximal red to brownish garnet skarn, and genetically associated with Bi- and Te-bearing minerals. Skarn deposit developed in the Geodo mine area is considered as oxidized Au skarn category, based on chemical composition of the Eopyeong granitoids, zonation of skarn, and gold occurrences. Garnet-rich skarn zone will be the main target for exploration of gold in the study area. However, it is needed to the detailed survey on vertical zonation of this area as well as lateral zonation. The result of this survey would provide an important basis for the exploration of the skarn Au deposit in the Geodo mine area.

Key words : Geodo mine, Taebaeksan mineralized district, Eopyeong granitoids, oxidized Au skarn deposit

태백산 광화대 중부에 위치한 거도광산은 최근 수 십년간 휴광상태이지만, 1963년부터 철과 동을 개발하였던 지역이다. 거도광산 지역은 장산규암, 묘봉층, 풍촌층, 화절층, 동점층 및 두무골층과 후기에 이를 관입한 백악기 어평화강암체로 구성되어 있다. 거도 스카른을 형성시킨 어평화강암체의 조성은 상대적으로 산화된($Fe_2O_3/FeO=0.3\sim1.1$) 자철 석계열의 석영몬조섬록암과 화강섬록암으로, 이들의 관입은 묘봉층, 풍촌층 및 화절층 내에 스카른 광화작용을 발달시켰다. 근지 외성 스카른은 어평화강암체 인근의 철이 부화된 안드라다이트(*andradite*) 석류석($Ad_{44-95}Gr_{1-53}$)이 우세한 지역에서 점차 멀어지면서 철이 결핍된 투회석($Hd_{10-100}Di_{0-89}$)이 우세한 지역의 순으로 대상분포를 보인다. 이러한 석류석과 휘석의 다른 분포 특성은 모암의 조성 및 물/암석비 등의 차이에 기인된 것으로, 전체 스카른 시스템의 산화정도를 평가하는 중요한 요소이다. 거도광산의 금은 주로 근지의 적갈색 내지 갈색의 석류석이 우세한 스카른에서 산출되며, 성인적으로 함 비스무스-텔루륨 광물들과 밀접한 공생관계를 가진다. 거도광산의 금광작용과 관련된 관입암의 화학조성, 스카른대의 분포와 금의 산출특성 등은 산화형 스카른 금광상의 환경을 지시하며, 높은 석류석/휘석비를 갖는 스카른대가 탐사대상이 된다. 그러나 연구지역의 수평적 대상분포 외에 수직적 대상분포 특성에 대한 정밀탐사가 요구된다. 이는 거도광산 스카른대의 3차원적 이해를 가능하게 하며, 보다 체계적 탐사 및 구체적 개발 방안을 제시하는 중요한 기반을 제공할 것이다.

주요어 : 거도광산, 태백산광화대, 어평 화강암체, 산화형 스카른 금광상

*Corresponding author: geochemsky@hhu.ac.kr

1. 서 론

국제금융위기 이후 금속가격이 급격한 하락을 경험하긴 했지만, 경제회복에 대한 기대감과 경제회복 후 이어질 금속가격 반등에 대비하여 자원 확보에 대한 열의는 식지 않고 있다. 특히 금 가격은 달러가치의 하락과 안정적인 자산의 선호로 인해 여전히 고공행진을 계속하고 있다. 따라서 국내에 금을 안정적으로 공급하기 위해, 국내 금속 광상에 대한 재해석이 절실히 필요하다.

모든 금속광상의 경제성 평가는 여러 가지 요인에 의해 지배되지만, 그러한 요소들 중 가장 중요한 것은 금속 가격이다. 1970년대 금 가격이 급격히 상승하기 전까지 스카른광상으로부터 생산되는 대부분의 금은 다른 천금속의 채광 시 생산되는 부산물이었다. 그러나 다른 스카른광상과 달리, British Columbia Hedley 지역의 Nickel Plate 광산은 예외적으로 고품위 금이 산출되어, 금을 개발대상 광종으로 생산하였다. 이후 스카른 광화작용에 수반되는 고품위 금광상에 대한 관심이 증가되었으며(Ray *et al.* 1996; Ettlinger *et al.* 1992; Ray and Dawson, 1987, 1988, 1994), Nickel Plate 스카른 금광상과 함께 이와 유사한 미국 네바다주 Fortitude 광상은 스카른 금광상의 탐사 모델을 정립하는 중요한 역할을 하였다.

스카른 금광상에 대한 용어는 Einaudi *et al.* (1981)에 의해 스카른 환경에서 형성된 금을 대상으로 경제적 관점에서 처음 사용되었다. 이 광상의 가장 주요한 특징은 반드시 1g/t 이상의 금을 함유하고 있어야 하며, 스카른 환경을 지시하는 광물학적 특성(석류석과 휘석의 존재)을 가져야한다고 정의하고 있다(Theodore *et al.*, 1991).

거도광산 지역은 1980년대에 여러 차례 연구가 이루어졌으며, 주로 철과 동 광화작용에 관심을 가졌다(Chang and Park, 1982; Ko and Kim, 1982; Choi, 1989). 그러나 최근 조사에서 거도광산지역의 석류석 스카른에 발달한 금광체가 보고되었으며, 이는 전단대에 의해 규제된 후기변질작용에 수반된 렌즈상 또는 비연속성의 맥상 광체로 맥폭은 0.3~10.0 m이고, 연장은 10~60 m이다(KORES, 2003). 이 지역에서 산출되는 광석의 품위는 0.05~40.8 g/t Au, 0.05~362 g/t Ag, 0.01~7.78% Cu, 0.01~0.54% As, 10.0~680 ppm Bi 인 것으로 보고되었다(KORES, 2003).

이번 연구는 거도광산지역의 스카른 광화작용을 야기시킨 관입암을 스카른 금광화작용과 관련하여 재해석하고, 스카른 광물의 지화학적 특성 및 금의 산출특

성 등을 제시하고자 한다. 또한 다른 세계적인 규모의 스카른 금광상과의 비교를 통해 스카른 금광상으로서의 가능성을 제시함과 동시에 탐사를 위한 광상성인모텔을 제시하고자 한다.

2. 태백산분지의 광역지질

태백산분지는 선캠브리아기 변성퇴적암류와 고생대 상·하부의 석회암층(조선 누층군) 및 중생대 탄질 퇴적층(평안 누층군)으로 구성되어 있으며, 이들 암석을 중생대 백악기의 화강암류들이 후기에 관입하고 있다. 태백산분지 내에 분포하는 조선 누층군은 영남육계의 상부에 부정합적으로 놓여있고, 주로 천해와 조석환경에서 형성된 탄산염암층으로 구성되어 있다(Chough, 2000). 광범위하고 층후가 두터운 석회암층으로 구성된 조선누층군은 태백산분지 내에 분포하는 스카른 광상을 배태하고 있으며, 스카른 광화작용을 위한 모암으로서의 중요한 역할을 하고 있다. 중생대의 화성활동 기간 동안 태백산분지 내에 여러 유형의 스카른광상들이 형성되었으며, 신예미(연-아연-철), 상동(텅스텐), 거도(동-철-금), 연화 제 I과 II(연-아연), 동남(철-몰리브덴), 동원과 둔전(금-은) 및 원동(연-아연-몰리브덴) 광상 등이 대표적인 예이다(Fig. 1). 이들 화성활동은 서쪽 신예미 연-아연-철광상을 형성시킨 신예미 화강암(60 Ma: Park *et al.*, 1988)을 기준으로 동부로 가면서 상동 텅스텐(85Ma: Farrar *et al.*, 1978)과 거도 동-철-금(105 Ma: Farrar *et al.*, 1978; 107 Ma: Kim, 1971, and 107~111 Ma: Yun, 1986)을 수반하는 화강암류들이 분포하고 있으며(Fig. 1), 동부에서 서부로 가면서 연대가 더 젊어지는 경향을 보인다.

태백산분지는 현재 4번의 변성작용을 받은 것으로 간주된다(Kim and Won, 1987; Kim *et al.*, 1988, Kim and Kee, 1991; Kim and Lee 1991, Kim, 1994; Kim *et al.*, 1994). D1 변성작용은 선캠브리아기와 초기 고생대 층간의 연성 전단대에서 발생하였으나, 시기는 불분명하다. 송림조산운동 시기동안 D2 변성작용은 남동방향으로 경사하는 북동방향의 습곡과 드러스트를 발달시켰다. 대보조산운동 시기에 발생한 D3 변성작용 역시 북동주향의 남동으로 경사하는 습곡과 드러스트를 발달시켰다(Chough, 2000). Kim *et al.* (1994)은 마지막 시기인 D4 변성작용은 백악기 후기에서 제 3기에 걸쳐 발생한 불국사 조산운동 시기동안 동서 방향의 습곡과 단층들을 야기시킨 것으로 보고하였다. 현재 태백산분지는 북북동 방향의 대규모 단층들과 이들과 거의

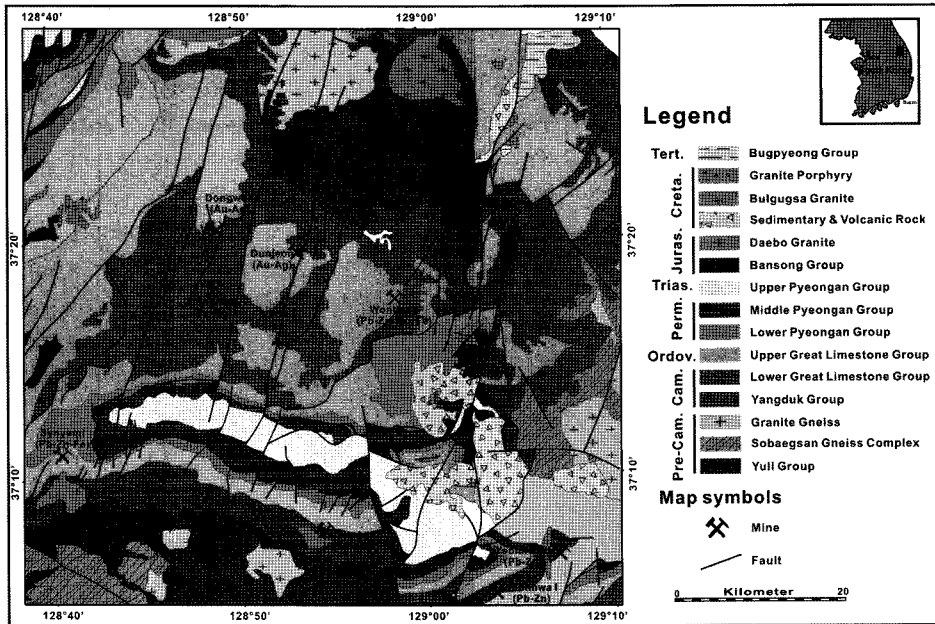


Fig. 1. Geological map showing the distribution of various type skarn deposit in the Taebaeksan Basin.

수평방향으로 발달한 소규모 단층들이 우세하게 분포한다(Fig. 1).

3. 거도광산

3.1. 지질

거도광산지역은 캄브리아기 양덕층군의 최하부인 장산규암층을 기저로 하여 상부로 가면서 묘봉층(슬레이트), 풍촌층(석회암), 화절층(석회암), 동점층(규암) 및 두부골층(석회암)으로 구성되어 있다. 이들 퇴적층들은 대체적으로 북동 방향의 주향을 가지며, 남서에서 북동 방향으로 정합적으로 놓여 있다(Fig. 2).

이들 층을 후기에 관입한 어평화강암체는 석영 몬조섬록암 내지 화강섬록암의 조성을 갖는다. Yun (1986)은 화강암류 내에 산출되는 흑운모의 K/Ar 연대측정법을 통해 관입 시기를 각각 석영 몬조섬록암은 $108 \pm 1 \sim 111 \pm 1$ Ma와 화강섬록암은 $107 \pm 1 \sim 109 \pm 1$ Ma로 보고하였다.

석영 몬조섬록암은 후기의 화강섬록암에 의해 포획된 흔적들이 흔히 관찰되며, 회색 내지 암회색을 띤다. 주 구성광물은 중립 내지 세립의 석영, 사장석, 정장석, 휘석 및 흑운모 등이 있다. 반면 이를 후기에 관입한 화강섬록암은 대체적으로 사장석이 반정으로 나타나는 반상조질을 보인다(KORES, 2003).

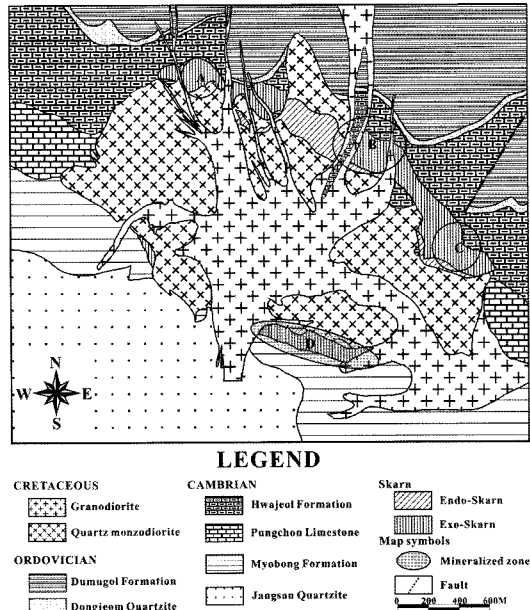


Fig. 2. Local geology of the Geodo mine area (modified from Chang and Park, 1982). Mineralized zones: A. Western part mineralized zone; B. 78 mineralized zone with 78 adit; C. Yugog mineralized zone with Yugogaidit; D. Southern part mineralized zone with Taebaek and Jangsan adit.

거도광산 지역에서 스키른 광화작용은 묘봉층, 풍촌층 및 화절층에 배대한다. 묘봉층은 장산규암층의 상

부에 정합적으로 놓여 있으며, 어평화강암체와의 접촉으로 열변성작용을 받아 일부는 혼펠스화되어 있다. 또한 남부광화대 지역은 교대작용을 통해서 스카른 철-동 광화작용을 수반한다. 반면에 주로 순수한 석회암으로 구성된 풍흔층과 화절층은 대규모의 외성스카른 변질대를 형성한다. 서부, 칠팔 및 유곡 광화대 지역의 화절층은 스카른 광화작용과 함께 금-비스무스-동 광체를 배대하고 있다.

3.2. 화성암류의 특성

스카른 광상들은 화성활동과 직접적인 관련성을 갖기 때문에, 화성암의 조성과의 스카른 광화작용 유형에 관한 연구가 활발히 수행되었으며(Zharikov, 1970; Kwak and White, 1982; Nweberry, 1987), 특히 Meinert

(1995)는 스카른 광상유형(철, 금, 동, 아연, 텅스텐, 몰리브덴 및 주석)에 따라 관계 화성암류의 지구화학적 특성을 체계적으로 정립하였다. 이번 연구에서는 기존에 보고된 어평화강암체의 조성(Chang and Park, 1982; Yun, 1986; Choi, 1989)을 이용하여 스카른 금광상을 형성시킨 관계 화성암의 특성을 재검토하였다.

스카른 광화작용과 관련된 화강암류의 SiO_2 함량에 대한 K/Rb비에 근거할 때, 연구지역의 스카른을 형성시킨 어평화강암체는 중간정도로 진화된 I-type의 범주에 해당된다(Fig. 3A). 또한 SiO_2 함량에 대한 $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ 비가 약 0.3~1.1로, 모두 자철석 계열로 분류된다(Fig. 3B). 화강암류는 FeO (총함량)에 대한 $\log(\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO})$ 의 값에 따라 VSO (very strong oxidized), SO (strong oxidized), MO (moderated oxidized), MR (mo-

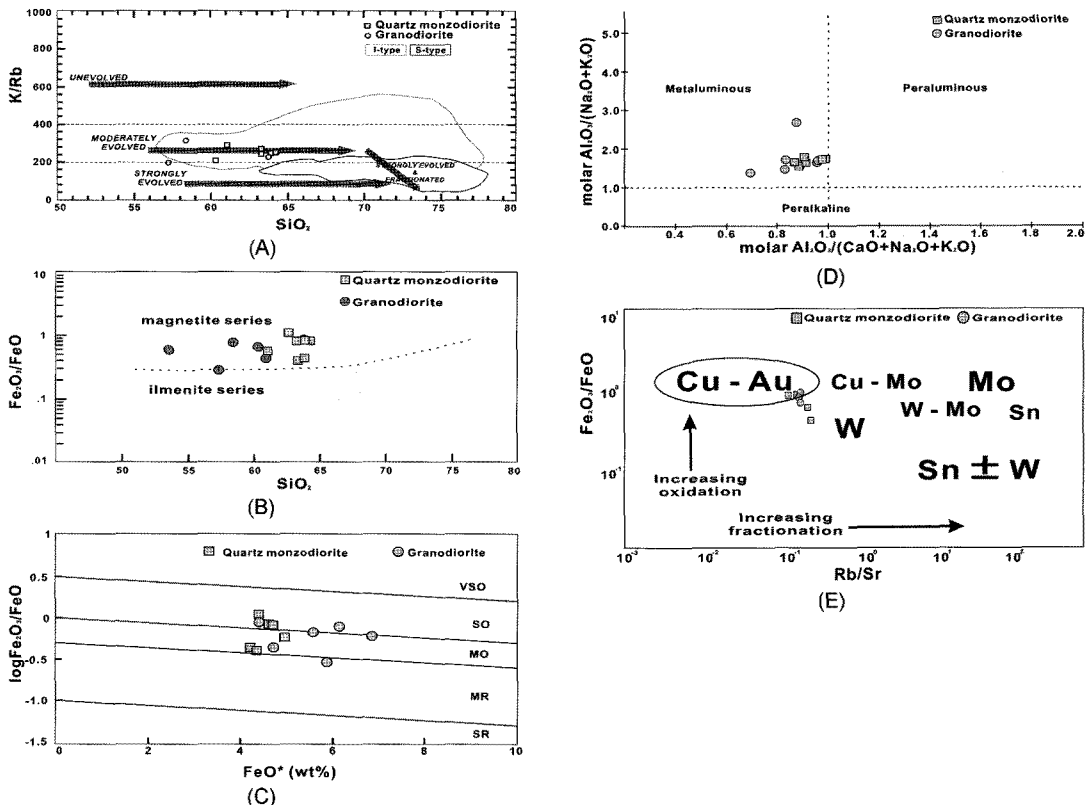


Fig. 3. Characteristics of the Eopyeong granitoids. (A) Plot of SiO_2 versus K/Rb showing classification fields and typical trends (modified from Blevin, 2003). The compositions of the Eopyeong granitoids classified into moderately evolved and I-type granite. B. Plot of SiO_2 versus $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ showing the division of the Eopyeong granitoids into magnetite- and ilmenite-series. Illustration of oxidation state (C) and aluminum saturation (D) of the Eopyeong granitoids related to the Au-bearing skarn in the Geodo mine. E. Plot of Rb/Sr versus $\text{Fe}_2\text{O}_3/\text{FeO}$ showing the relationship between the principal ore element and the composition of the plutons associated with mineral deposits (modified from Blevin, 2003). A. FeO^* refers to all Fe in the sample reported as FeO. Labels: VSO - very strongly oxidized, SO - strongly oxidized, MO - moderately oxidized, MR - moderately reduced, SR - strongly reduced. The compositions of the Eopyeong granitoids originated from Chang and Park (1982), Yun (1986), and Choi (1989).

derated reduced) 및 SR (strong reduced)로 구분된다 (Blvein, 2003). 어평화강암체는 VSO~MO의 영역에 도시된다(Fig. 3C). 화강암류의 알루미늄 포화도에 따르면, 어평화강암체는 메타알루미나와 과알루미나의 경계부를 따라 상대적으로 분화가 덜 된 메타알루미나 영역에 도시된다(Fig. 3D). 화강암류의 산화정도와 분화정도에 따라 수반되는 광화작용 구분에서, 어평화강암체는 상대적으로 높은 Fe_2O_3/FeO 비와 낮은 Rb/Sr비로 인해 동-금 광화작용 영역에 대부분 도시된다(Fig. 3E).

3.3. 스키른 대상분포

일반적으로 스키른 광상은 광화유체와 모암의 반응비에 따라 스키른광물이 대상으로 발달하며, 거도광산에서도 이러한 특성이 잘 나타난다. 금-비스무스-동 광화작용을 수반하는 칠팔, 유곡 및 서부광화대 지역은 하부 셰일과 중·상부 석회암으로 구성된 화절층을 모암으로 하는 외성 스키른이 내성 스키른에 비해 우세하게 발달되어 있다. 어평화강암체의 석영 몬조섬록암과 화절층의 접촉부를 경계를 따라 대략 200 m 정도의 폭을 갖는 근지성 외성스키른이 잘 발달되어 있다 (Fig. 2). 근지성 외성스키른을 명확히 세분하기는 어려우나, 관입암에서부터 거리가 멀어지면서 우세하게 산출되는 광물조합에 따라 석류석-녹염석-정장석 스키른과 석류석-투회석 스키른을 거쳐 투회석-석류석-녹염석-녹니석 스키른의 순으로 구분할 수 있다. 반면에 칠-동 광화작용을 수반하는 남부광화대 지역은 석영 몬조섬록암 내에 석류석-투회석-녹염석으로 구성된 내성 스키른이 발달하고 있으며, 외성 스키른은 우세하게 산출되는 광물조합에 따라 자철석, 자철석-석류석 스키른, 석류석-회석 스키른 및 회석-사장석-녹염석 스키른의

순으로 발달한다.

스키른 광물의 대상분포 외에 상대적으로 후기에 형성된 광석광물은 주로 석류석 스키른과 석류석-회석 스키른의 전이대에서 산출된다. 구체적으로, 철과 금 광화작용은 화성암류와 모암의 접촉부에 접하거나 인접한 지역에 발달한 석류석 스키른 내에 수반되는 반면에, 동의 광화작용은 상대적으로 보다 먼 거리에 분포하는 석류석-회석의 전이대에서 산출된다.

3.4. 광석광물과 금의 산출

외성 스키른이 우세한 칠팔, 유곡 및 서부 광화대 지역은 황동석이 주로 산출되고, 금, 반동석, 휘동석, 황철석 및 자유철석 등이 소량 산출된다. 특히, 칠팔 광화대 지역은 함 Au-Bi-Te-광물이 다량 관찰된다. 반면 내성 스키른이 수반되는 남부 광화대 지역은 자철석을 주 구성 광석광물로 소량의 황동석이 산출된다(KORES, 2003).

거도광산의 금은 주로 어평화강암체와의 접촉부에 발달한 적색 내지 적갈색의 석류석과 밀접하게 수반되어 산출된다(Fig. 4A). 또한 금은 휘창연석 및 테트라디마이트(tetradymite)와 함께 공생하며, 산출입자의 크기는 육안으로 관찰이 가능한 수 mm의 비교적 큰 입자에서부터 수 μm 까지 매우 다양하다(Fig. 4B, 5C-E). 현미경 하에서 금은 석류석 결정들의 경계면을 따라 빈 공간을 충전하며 산출되는 것이 뚜렷이 관찰된다. 이때 금은 함 Bi- 및 Te-광물과 공생하여 산출되며, 수 십~수 백 μm 로 비교적 입자가 크다(Fig. 5C). 또한 산점상의 금이 석류석 주변에서 수 μm 크기로 산출되기도 한다(Fig. 5연석 및금과 함께 산출하는 휘창연과 테트라디마이트는 현미경 하에서 상호간 밀접한 공생관

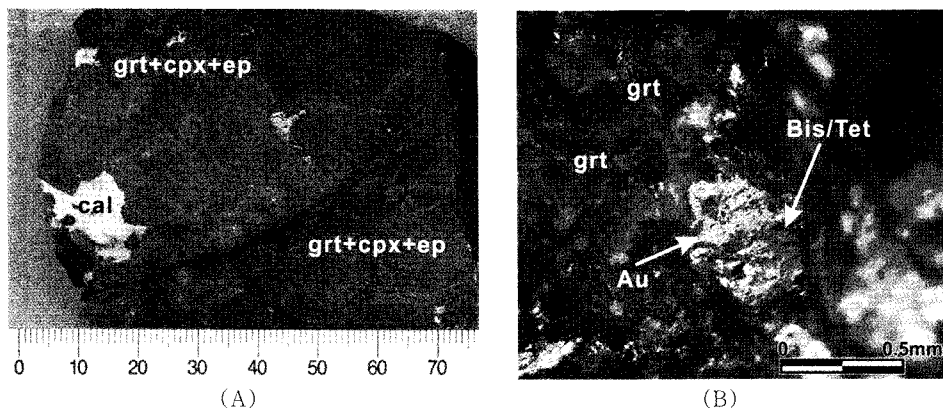


Fig. 4. Gold occurrences in Au-rich ore at the 78 adit from the Geodo mine area. Abbreviations: Au: gold; Bis: bismuthinite; cal: calcite; cpx: clinopyroxene; ep: epidote; grt: garnet; Tet: tetradymite.

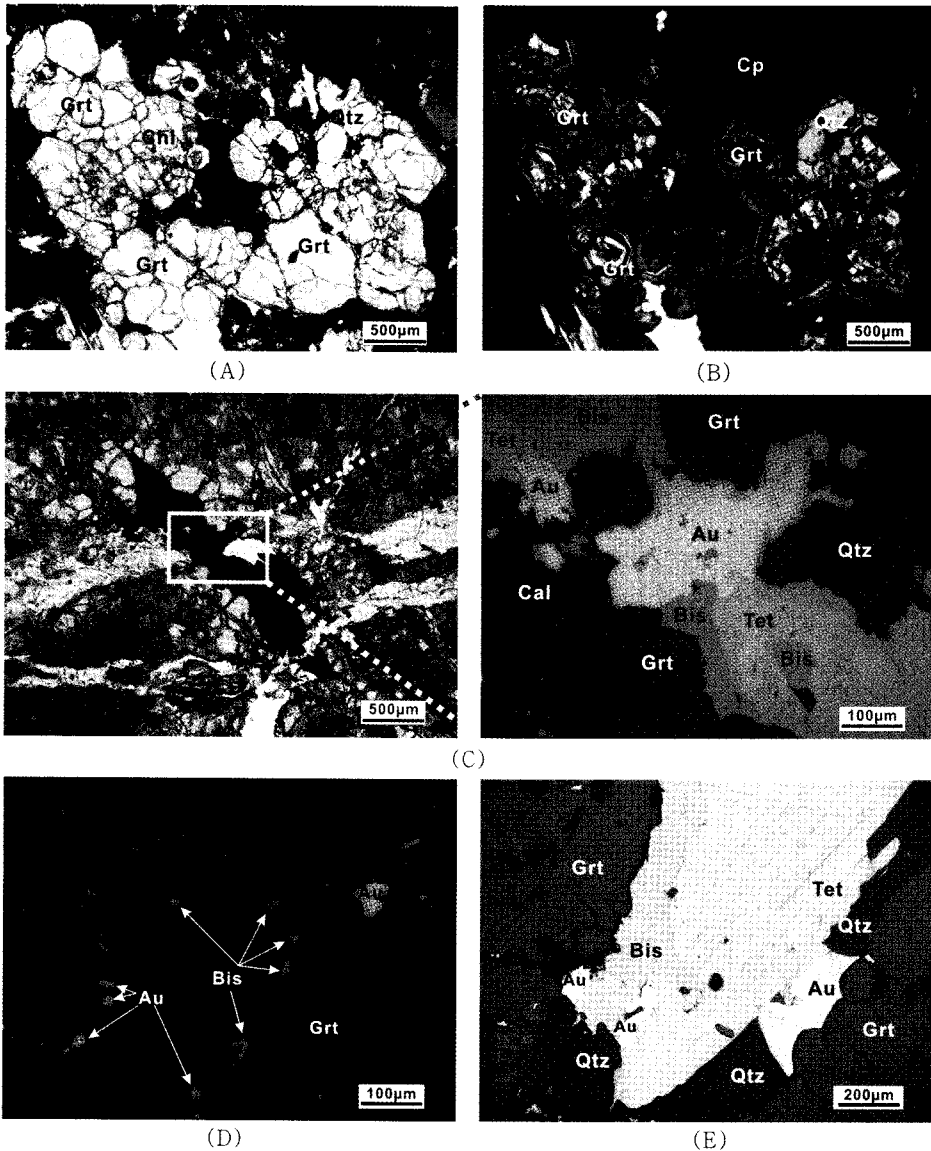


Fig. 5. Photomicrographs of garnet and gold in the Au-rich ore at the 78 adit. Garnet occurs as coarser-grained crystal and shows the complexly oscillatory zonation (A: open nicol, B: cross nicol). Gold occurs in open space between garnet-garnet boundaries and gold grain closely related to bismuthinite and tetradymite (C) and sometimes occurs relatively small size as single grain (D). Tetradymite shows exsolution texture with bismuthinite (E). Abbreviations: Au: gold; Bis: bismuthinite; Chl: chlorite; Qtz: quartz; Grt: garnet; Cp: chalcopyrite; Tet: tetradymite; Cal: calcite.

계를 보인다. 특히, 테트라디마이트 내 특정 방향의 결정면을 따라 휘창연이 농집되는 용리조직이 관찰된다 (Fig. 5E). 이는 고온의 열수유체 내에 불완전하게 혼합되어 있던 휘창연과 테트라디마이트가 냉각하는 동안 두 광물로 분리되면서 형성된 것으로 사료된다.

석류석과 휘석 스카른 변질대의 암석 시편(rock chip) 및 토양시료를 대상으로 Oriental minerals Ltd와 공

동으로 수행한 지화학적 탐사 결과는 Fig. 6에 제시되었다. 암석 시료의 금과 동 함량은 각각 최대 2.61 g/t과 0.4%이며, 토양시료는 각각 최대 3.5 g/t과 1%이다. 동과 금의 지구화학적 이상대는 거의 동일지역에 나타나며, 어평화강암체를 중심으로 남쪽에 위치한 장산강과 태백강 지역은 상당히 높은 금과 동의 이상치를 나타낸다. Au-Bi-Te 조합의 광물들이 산출되는 칠팔 광

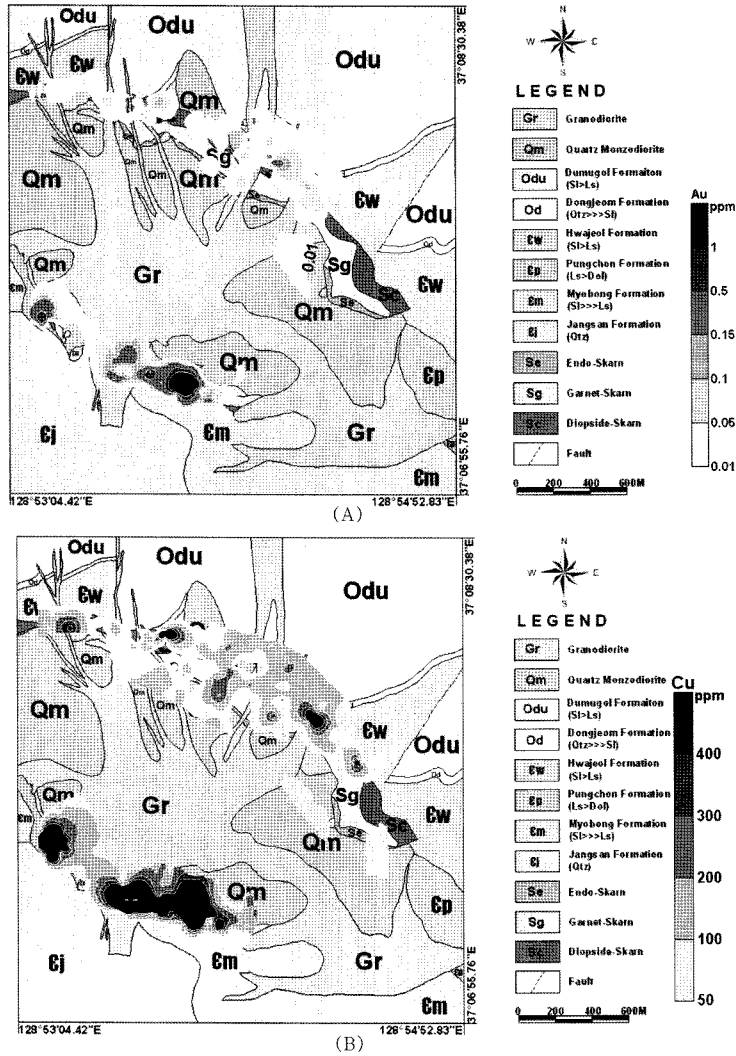


Fig. 6. Geochemical maps showing the gold anomaly (A) and copper anomaly (B). Geochemical data were originated from Oriental minerals Ltd and KORES, respectively.

화대 또한 금과 동이 이상치가 비교적 높게 나타난다 (Fig. 6).

3.5. 스키른 광물의 지화학적 특성

연구지역은 철, 동, 및 금의 광화작용이 관찰되며, 이들 중 금 광화작용과 관련된 광석은 주로 석류석과 소량의 휘석 및 함 Bi-와 Te-광물, 석영, 녹니석 등으로 구성되어 있다. 금을 수반하는 석류석은 흔히 복잡한 진동누대(oscillatory zonation)구조가 잘 관찰된다 (Fig. 5A and B). 이러한 누대구조는 석류석 결정이 구성하는 성분들의 변화에 의해 기인된 것으로 열수유체의 유동과 정체의 반복에 의해 형성된 것으로 이해

된다. 금이 부화된 광석에서 관찰되는 석류석은 주로 안드라다이트(Andradite)-그로술라(Grossular)의 고용체로 산출되며, 안드라다이트($Ad_{44.95}Gr_{1.53}$)가 우세하다. 이들은 중간 정도의 철 함량에서 철이 상당히 부화되는 조성범위를 보인다. 휘석은 Mn이 결핍된 헤덴버자이트(Hedenbergite)-투회석의 고용체로 산출되며, 주로 마그네슘이 부화되고 철이 결핍된 투회석($Hd_{10-100}Di_{0.89}$)의 조성을 가지지만, 일부는 헤덴버자이트에 속한다.

4. 토의 및 결론

금속광상의 광화작용 유형을 구분하고 성인모델을

제시하는 것은 특정 광상에 대한 학문적인 이해와 함께 탐사와 개발을 위한 방향을 제시하는데 있어서 아주 중요하다.

거도광산 지역은 1963년 이후 동과 철을 대상으로 개발된 바 있으며(Moon, 1991), 4개의 광화대(남부, 서부, 칠판, 및 유곡 광화대) 지역에 대한 시추자료 결과는 평균 금 함량이 1 g/t 이상인 것으로 보고된 바 있다(KORES, 2003). 또한 거도광산지역의 스카른대를 대상으로 수행한 지구화학탐사 결과에서도 금과 동의 함량이 수 ppm과 % 단위의 함량을 갖는 것으로 나타났다(Fig. 6). 연구지역은 일반적인 스카른 금광상에 비해 금의 품위가 상대적으로 낮으나, 관입암체의 지구화학적 특성, 광화작용 특성 및 금의 산출특성 등은 산화형 스카른 금광상에 대비될 수 있다.

4.1. 화성암류의 조성 and 스카른 광화작용의 유형

스카른 광상에서 금 광화작용은 흔히 석회질 퇴적암 내로 관입한 I-type의 섬록암 내지 화강암질 관입암과 관련되며, 중간정도로 진화된 I-type 범주에 속하는 어평화강암체도 이와 유사한 암석지구화학적 특성을 갖는다.

화성암류를 구성하는 주성분들 중에서 철은 자연에서 Fe^{3+} 와 Fe^{2+} 의 원자가 상태로 나타난다. 따라서 화강암류 내에서 철의 원자가 상태는 마그마의 전체적인 산화정도를 반영하고, 이는 수반되는 스카른에서 황의 함량 및 종과 유체와 휘발성분의 분리, 총 금속 함량, 수반되는 광화작용의 유형을 추정하는데 아주 중요하다(Meinert, 1995).

또한 화성암류의 산화도와 수반되는 스카른 광화작용의 유형은 상당히 밀접한 관련성을 갖는다. 예를 들어, 스카른 동, 철 및 금광상은 산화된 화성암류로부터 기원된 열수계로부터 형성되지만, 몰리브덴과 주석 스카른의 경우는 상당히 환원된 화성암류와 관련된다. 특히, 스카른 금광상을 형성시키는 화성암류에 대해서 자철석과 티탄철석 계열로의 분류는 수반되는 금 광화작용의 유형을 구분하는 중요한 요소이다(Meinert, 1995). 어평화강암체는 자철석계열의 산화된 특성을 보이며(Fig. 3B and C), 이는 환원형 스카른 금광상을 형성시키는 티탄철석 계열의 화성암류와 달리 산화형 스카른 금광상을 야기시키는 자철석 계열의 산화된(magnetite series, $Fe_2O_3/FeO > 0.4$) 화성암류의 특성과 일치한다.

일반적으로 스카른 동, 철 혹은 금광상을 수반하는 화성암류의 알루미늄 함량은 메타알루미나와 과알루미나의 경계부에 도식된다. 반면에 주석 스카른을 수반

하는 화성암류는 다른 스카른 광상과는 달리 과알루미나의 영역에 도시되며, 이는 퇴적암 성분들을 함유하는 대륙지각의 용융에 의해 형성된 것으로 이해된다(Meinert, 1995). 연구지역의 화강암류 조성은 스카른 동, 철 혹은 금광상을 수반하는 전형적인 화성암류의 조성과 유사하다. 그러나 화성암류의 조성이 메타알루미나에서 과알루미나와의 경계부에 이르는 조성의 차이는 산화환 환경에서 형성되는 I-type 마그마가 상대적으로 메타알루미나의 특성을 보이지만, 천부지각으로 상승하는 동안 대륙지각과 약간의 동화작용으로 인해 과알루미나와의 경계부 영역에 도시되는 것으로 이해된다.

화강암류의 주성분들 외에, 부성분들의 부화 및 결핍도 화성암류의 진화 및 분별정도를 판단하는데 유용하다. 예를 들어, Rb^+ 은 K-장석 내 K^+ 을 치환할 수 있으며, Sr^{2+} 은 휘석 내 존재하는 Ca^{2+} 를 치환할 수 있다. 일반적으로 마그마의 결정화작용 동안, 휘석은 상대적으로 초기에 형성되는 반면에 K-장석과 흑운모는 보다 후기에 형성되기 때문에 결정화작용과 분별정출작용이 많이 진행된 화강암류는 높은 Rb/Sr비를 갖지만, 그렇지 못한 화강암류는 낮은 Rb/Sr비를 갖는다. 연구지역의 어평화강암체는 후자에 해당되며, 화강암류의 진화 및 분별정도에 따라 수반되는 광화작용의 유형이 확연히 달라진다. 예를 들어, 주석, 텅스텐, 및 몰리브덴 광화작용을 수반하는 화강암류는 높은 Rb/Sr비를 갖는 반면에, 동과 금 광화작용을 수반하는 화강암류는 그 반대의 경향을 보인다(Fig. 3E).

어평화강암체는 높은 Fe_2O_3/FeO 비와 낮은 Rb/Sr의 특징을 갖는다. 이는 어평화강암체가 상당한 분화과정을 겪지 않았으며, 정지될 당시에 상당히 산화된 상태였음을 지시한다. 따라서 이러한 특징은 상대적으로 산화된 마그마 기원의 열수계로부터 수반되는 동-금 광화작용에 대비될 수 있다.

4.2. 대상분포

스카른 광물의 대상분포는 대부분의 스카른 광상에서 나타나며, 산출되는 석류석과 휘석의 조성은 스카른 시스템의 전반적인 산화정도를 반영하고, 특히 산화형과 환원형 스카른 금광상 사이에서 확연한 차이를 보인다.

연구지역에서 화절층을 모암으로 하는 광화대 지역에 발달한 스카른은 내성스카른보다 외성스카른이 더 우세하게 발달되어 있다. 이들 외성스카른은 어평화강암체와 석회암층의 경계부를 따라 석류석이 우세한 스

카른이 발달하며, 관입암에서 멀어질수록 휘석이 우세한 스카른 순으로 대상분포를 보인다.

대상분포하는 연구지역의 스카른의 양상은 산화된 마그마 기원 열수계로부터 기원된 변질특성을 그대로 반영하고 있으며, 이로부터 거도 스카른 시스템의 총체적인 산화정도를 추정할 수 있다. 어평화강암체와 모암의 접촉부를 경계로 외성스카른의 근지지역은 석류석이 우세하게 나타난다. 어평화강암체는 자철석 계열의 중간 내지 강하게 산화된 특징을 갖기 때문에, 이로부터 기원된 열수유체는 충분히 산화된 상태였을 것으로 추정되며, 초기 열수유체 내 철은 +3가의 형태로 존재했을 것이다. 따라서, 초기 열수유체와 모암과의 반응을 통해 외성스카른 내 근지에는 주로 Fe^{3+} 이 부화된 안드라다이트질 석류석이 우선적으로 침전된 것으로 이해된다. 반면에 접촉부로부터 멀어지면서 휘석이 우세한 스카른이 나타나게 되는데, 이는 초기 열수유체와 모암의 지속적인 반응을 통해 Fe^{3+} 이 점차적으로 소모되면서, 후기에 상대적으로 철이 결핍되고 마그네슘이 부화된 투회석류가 형성된 것으로 사료된다.

대부분의 스카른광상에서 나타나는 대상분포는 관계화성암으로부터 근지지역의 석류석 스카른에서 거리가 멀어지면서 휘석 스카른을 거쳐 대리암의 순으로 발달한다. 일반적으로 스카른 금광상에서 광석광물의 분포는 휘석 스카른 내 혹은 휘석 스카른과 대리암의 접촉부에 나타난다. 그 예로 캐나다 British Columbia의 Hedley 지역 Toronto 임주와 관련하여 발달하는 스카른 광상과 뉴멕시코의 Groundhog 스카른 등이 있다(Meinert, 2000). 대표적인 환원형 스카른 금광상인 네바다주 Fortitude 스카른 광상은 관계화성암으로부터 멀어질수록 석류석/휘석비가 낮아지지만, 금/은비는 점차 증가하는 경향을 보인다(Meyer and Meinert, 1991).

그러나 연구지역에서 산출되는 금은 어평화강암체와 모암의 접촉부에 발달한 적색 내지 적갈색의 석류석 스카른에서 주로 산출된다. 에콰도르 Nambija 지역의 산화형 스카른 금광상에서 산출되는 금은 석류석 스카른에서 주로 산출되며, 암록색 석류석이 우세한 스카른에서 관찰된다(Fontboté *et al.*, 2004). 따라서, 연구지역의 금의 산출 특성은 산화형 금광상에서 나타나는 특징에 대비될 수 있다. 산화형 스카른 환경에서 산출되는 석류석은 스카른 교대작용의 대상분포를 반영하는 색의 변화가 체계적으로 나타나며, 이러한 색 변화는 탐사의 중요한 지침으로 활용될 수 있다. 예를 들어, 미국 Bingham의 Carr Fork에서 산출되는 석류석은 내성 스카른에서 암적색으로 산출되고, 관계화성암으로부터

멀어지면서 점차 적색, 갈색, 노란색을 거쳐 연노란색으로 변한다(Atkinson and Einaudi, 1978).

4.3. 스카른 광물과 광석광물의 침전

일반적으로 석류석의 조성은 관입암 및 외성스카른과 관련하여 산출되는 지역에 따라 상당히 다양하다. 이는 열수유체의 이동통로에 따른 유체/암석비의 변화를 반영한 결과이며, 일반적으로 관입암 인근에서는 높은 유체/암석비를 갖지만, 원지로 갈수록 상대적으로 낮은 유체/암석비를 갖는다. 따라서 유체/암석비는 석류석 내에 철과 알루미늄의 상대적인 공급을 규제한다. 연구지역에서 산출되는 석류석은 전체적으로 안드라다이트-그로슬라 조성의 고용체를 형성하고 있다. 연구지역에서 산출되는 석류석과 휘석의 조성은 대표적인 산화형 스카른 금광상인 에콰도르 Nambija 지역의 스카른 금광상과 미국 네바다주 McCoy 광상에서 산출되는 광물들과 유사한 조성범위를 보인다(Fig. 7).

일반적으로 금과 밀접하게 수반되는 석류석은 광역적인 후퇴변성작용동안 안정한 상태로 존재하며, 약간의 TiO_2 를 함유하는 석류석으로서 석회질 내지 비석회질로부터 형성된 것으로 알려져 있다(Theodore *et al.*, 1991). 그러나 연구지역에서 산출되는 석류석 내 TiO_2 성분의 존재는 드물며, 금광석에 수반되는 휘석은 낮은 망간함량을 가지는 전형적인 투회석-헤네버자이트 고용체로 나타난다. 또한, 미국 네바다주 McCoy 광상의 경우, 휘석 내에 상대적으로 Mn 함량이 높은 요한

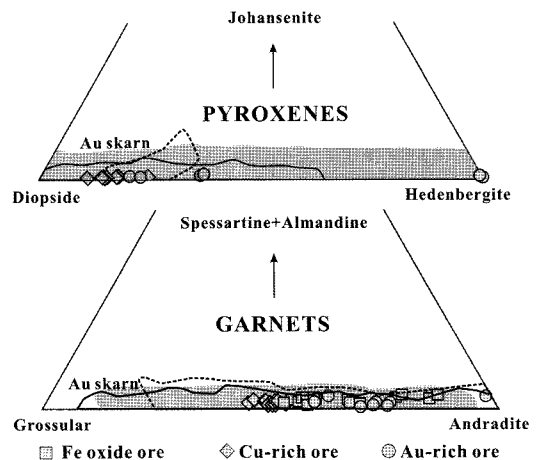


Fig. 7. Representative clinopyroxene and garnet compositions in the Geodo mine area. These are sampled from the garnet skarn zone in the study area(Kim, 2008). Dotted line is those of Nambija district, Ecuador, and bold one is McCoy deposit, Nevada.

세나이트(johansenite) 조성이 우세하게 나타나며, 이는 연구지역에서 산출되는 것과 다소 차이를 보인다. 이러한 차이는 열수유체와 모암의 화학조성의 차이에 기인한 것으로 여겨진다.

연구지역의 스카른을 배태한 풍흔층은 결정질 내지 괴상의 석회암과 이를 협재하는 어란상과 백운암질 석회암으로 구성되어 있고, 화절층은 하부의 석회질 세일, 중간층인 버미큘라(vermicular) 석회암 및 상부의 단괴상 석회암으로 구성되어 있다. 산화형 스카른에서 기원암이 상대적으로 순수한 석회암일 경우, 외성스카른 변질대는 철이 부화된 석류석과 철이 결핍된 투회석이 형성된다. 반면에, 기원암으로서 점토질 불질들을

풍부하게 함유하고 있다면, 석류석은 더 많은 알루미늄을 함유하게 된다. 연구지역에서 풍흔층보다는 화절층에서 주로 스카른 광체가 발달하고 있으며, 화절층의 하부는 일부 세일층이 존재하나 스카른의 발달이 주로 중간층과 상부에 나타나므로, 점토질 성분들을 함유하는 세일층에 의해 영향을 받지 않는 것으로 사료된다.

연구지역에서 광석광물의 공간적 분포는 전기의 전진 탈탄산화작용에서 후기의 수화작용에 밀접히 수반되어 초기의 스카른을 교대하면서 특정 지역에 선별적으로 침전된 것으로 보고된 바 있다(Yun, 1983). 일반적으로 스카른광상이 형성되는 환경은 크게 전기의 변질작용 시기와 상대적으로 후기의 광화작용 시기로 구

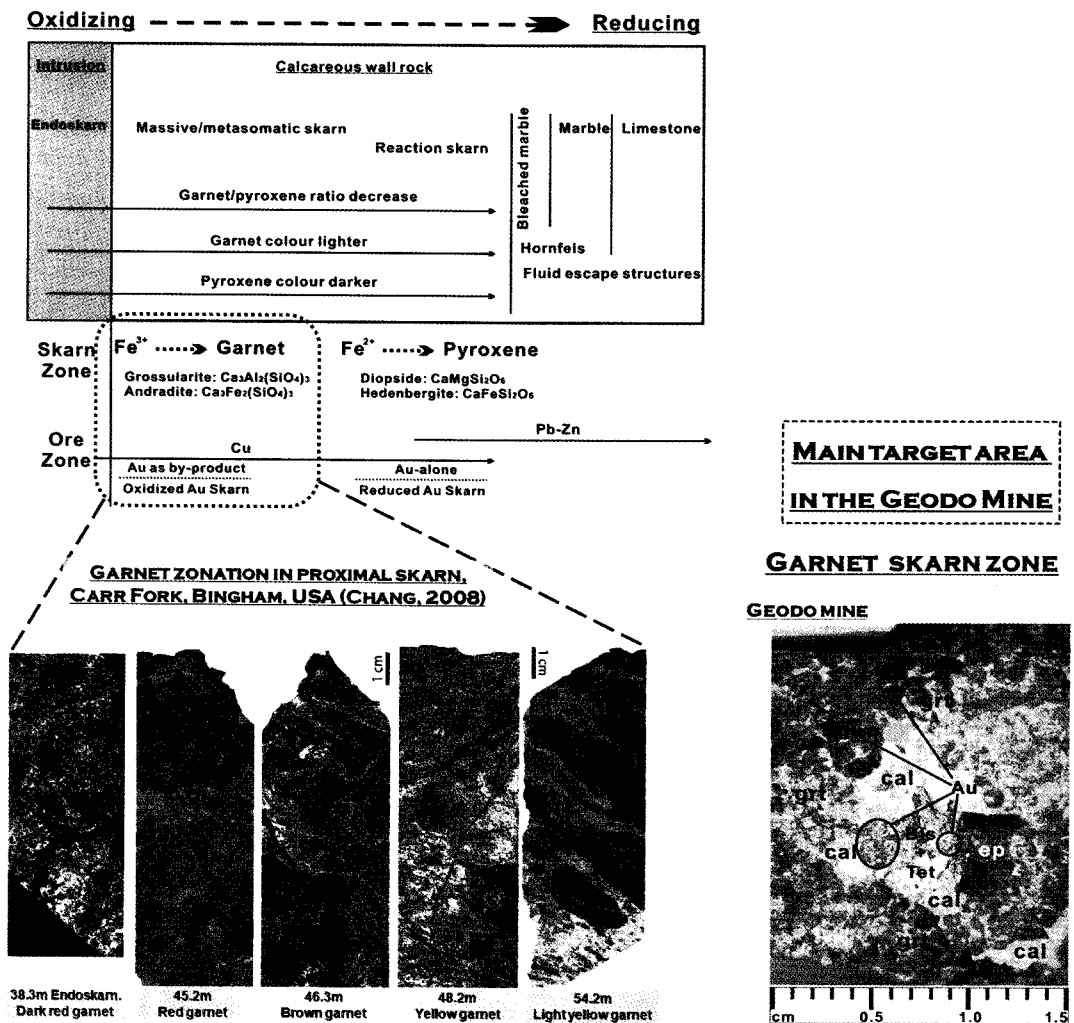


Fig. 8. Genetic model for exploration of the Au-bearing skarn in the Geodo mine area (modified from Chang, 2008). Typical zonation of garnets away from intrusion or fluid conduits in Carr Fork, Bingham, USA (Chang, 2008) and gold-rich ore from the Geodo mine area (right).

분된다. 석류석과 휘석 및 규회석과 스카폴라이트(scapolite)가 형성되는 변질작용 시기는 전체 스키른 시스템의 초기이며, 상당한 고온의 환경에서 형성된다. 따라서 광석광물들은 고온의 환경으로 인해서 유체 내에서 높은 용해도를 갖기 때문에 광석광물의 침전이 어렵다. 그러나 초기 전진 시기 이후 후퇴변질작용이 뒤따르며, 이 시기에서 와서 광석광물들은 유체 내 용해도의 급격한 감소로 인해 침전이 이루어진다. 따라서, 연구지역에서 광석광물의 침전은 전진변성작용 시기 동안 형성되기 보다는 후기의 저온 환경인 후퇴변성작용 시기 동안 형성된 것으로 사료된다.

연구지역의 스키른 광화대에서 금은 함 Bi-와 Te-광물들과 함께 산출된다. 비스무스와 텔루륨을 함유한 광물들의 조합은 세계적인 규모의 스키른 금광상에서 나타나는 주요한 특징 중의 하나이다(Crown Jewel deposits, Washington: Hickey, 1990; Rio Narcea district, Spain: Cepedal *et al.*, 2006). 최근 몇몇 연구는 금을 운반하는 복합체로 AuCl₂, AuHS, AuS의 형태가 아닌 비스무스 멜트(melt)에 의해 금의 운반과 침전이 이루어진다고 보고한 바 있다(Cepedal *et al.*, 2006; Ciobanu *et al.*, 2007; Tooth *et al.*, 2008). 따라서 연구지역의 20스카른 변질대에 발달한 함 Bi-와 Te-광물의 침전. 따라서 연금광화작용은 스키른 금광상의 주요한 특징과 대비될 수 있다.

산화형과 환원형 스키른은 광석광물의 분포특성에 있어서 차이를 보인다. 전자의 경우 석류석 스키른 및 석류석-휘석 스키른의 전이대에 걸쳐 동 광화작용이 발생하며, 금은 부산물로서 산출된다. 그러나 후자는 금 외에 다른 금속광물의 산출이 드물다. 거도광산지역에서 특정 금속원소(금과 동)의 지구화학적 분포특성은 전자에 해당한다. 즉 금과 동의 지구화학적 이상이 동일 지역에서 나타난다.

화성암류의 특성, 스키른 변질작용 및 광물의 분포 특성과 금의 산출특성 등 거도광산지역에 발달한 금광상은 산화형 스키른 금광상의 특징과 잘 일치한다(Fig. 8). 시추자료와 토양 및 암석 지구화학탐사 결과는 거도광산에 광범위한 금 이상대(또는 광체)가 존재함을 보여준다. 따라서, 정확한 광상생성모델을 적용한 체계적인 탐사를 수행하여 개발 타당성에 대한 경제성 평가가 절실히 요구된다. 따라서 거도지역에 발달한 스키른 변질대의 3차원 분포 특성과 함께 금의 운반과 침전에 대한 새로운 접근과 체계적인 연구가 수행되어야 할 것이다. 이러한 연구결과는 거도지역에 발달한 스키른 광화작용에 관한 총체적인 시스템의 이해와 함께,

스카른 금광상의 체계적이고 실질적인 탐사방안과 개발방안을 설립하는데 중요한 역할을 담당할 것이다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원이 수행하고 있는 기관고유연구사업인 “지구·행성 진화추적 원천지질기술 개발(09-3611)”에서 지원되었다. 또한 이 논문의 내용에 관한 자세한 지적과 건설적인 제안을 해주신 충북대학교 최상훈 교수님과 익명의 심사위원님께 깊은 감사함을 드립니다.

참고문헌

- Atkinson, W.W., JR. and Einaudi, M.T. (1978) Skarn formation and mineralization in the Contact Aureole at Carr Fork, Bingham, Utah. *Economic Geology*, v. 73, p. 1326-1365.
- Blevin, P.L. (2003) Metallogeny of granitic rocks in magmas to mineralization. *Ishihara symposium*
- Blevin, P.L. (2004) Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia: Implication for gold-rich ore systems. *Resource Geology*, v. 54, p. 241-252.
- Cepedal, A., Fuertes-Fuente, M., Martin-Izard, A., Gonzalez-Nistal, S. and Rodriguez-Pevida, L. (2006) Tellurides, selenides and Bi-mineral assemblages from the Rio Narcea Gold Belt, Asturias, Spain: Genetic implications in Cu-Au skarn and Au skarns. *Mineralogy and Petrology*, v. 87, p. 277-304.
- Chang, H.W. and Park, K.H. (1982) Petrogenesis of Fe-Cu bearing Skarn at Keodo. *Report of metal deposit, KIER*, v. 14, p. 129-155.
- Chang, Z. (2008) Zonation in skarns and controlling factors. 9th National Conference of Mineral Resources of China, Nov. 2008.
- Choi, J.B. (1989) Mineralogy of skarns and associated minerals in the Geodo Mine, Korea. Unpub. Ph.D. thesis, Seoul National University, 247p.
- Chough, S.K., Kwon, S.T., Ree, J.H. and Choi, D.K. (2000) Tectonic and sedimentary evolution of the Korea peninsula: a review and new view. *Earth-Science Reviews*, v. 52, p. 175-235.
- Ciobanu, C.L., Birch, W., Pring, A. and Cook, N.J. (2007) Au-Bi-Te-S assemblages from Maldon gold deposit, Victoria, Australia. *Geological Society of America Abstracts with Programs*, v. 39, p. 626.
- Einaudi, M.T., Meinert, L.D. and Newberry, R.J. (1981) Skarn deposits. *Economic Geologists 75th Anniv. Vol.*, p. 317-391.
- Ettlinger, A.D., Meinert, L.D. and Ray, G.E. (1992) Gold skarn mineralization and fluid evolution in the Nickel Plate deposit, Hedley district, British Columbia. *Economic Geology*, v. 87, p. 1541-1565.
- Farrar, E., Clark, A.H. and Kim, O.J. (1978) Age of the Sangdong tungsten deposit, Republic of Korea, and its

- bearing on metallogeny of the southern Korean Peninsula on metallogeny of the southern Korean Peninsula. *Economic Geology*, v. 73, p. 547-566.
- Fontboté, L., Vallance, J., Markowski, A. and Chiaradia, M. (2004) Oxidized gold skarn in the Nambija district, Ecuador. *Society of Economic Geologists, Reviews in Economic Geology*, v. 11, p. 341-357.
- Hickey, R.J., III. (1990) the geology of the Buckhorn nountain gold skarn Okanagon County, Washington. Unpublished M.S. thesis, Pullman, Washington State University, 171 p.
- Kim, D.Y., Song, Y.S. and Park, K.H. (1988) Petrology, geochemistry and geochronology of charnockite in eastern Jirisan area. *Annu. Meeting Petrol. Soc.* p. 35-36.
- Kim, E.J. (2008) Bi- and Te-Bearing Skarn Gold Mineralization on the Geodo Mine, South Korea. Unpublished M.S. thesis, Busan, South Korea, Pukyong National University, 90 p.
- Kim, J.H. (1994) Structure in the Taebaeksan zone. In: Ree, J.H., Cho, M., Kwon, S.I.T., Kim, J.H. (Eds.), *Structure and Metamorphism of the Ogcheon Belt: Field Trip Guidebook. IGCP Project 321 Organizing Committee.* p. 23-57.
- Kim, J.H. and Kee, W.S. (1991) Tectonic significances of the Soonchang shear zone, the Hwasum coalfield, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p. 642-655.
- Kim, J.H. and Lee, J.D. (1991) Geologic structures of the Yemi area, Kangweon-do, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p. 500-514.
- Kim, J.H. and Won, C.H. (1987) Structural analysis of Hwangji-area, Samcheog coalfield, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 23, p. 136-144.
- Kim, J.H., Lee, J.Y. and Nam, K.H. (1994) PreJurassic thrust movement in Danyang area, Danyang coalfield, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, v. 30, p. 35-40.
- Kim, O.J. (1971) Study on the intrusion epochs of younger granites and their bearing to orogenesis in South Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 4, p.1-9.
- Ko, J.D. and Kim, S.J. (1982) Mineralogy and genesis of Fe-Cu and Au-Bi-Cu deposits in the Geodo mine, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 15, p. 189-204.
- KORES (2003) A close investigation report of the Geodo mine area, 123p.
- Kwak, T.A.P. and White, A.J.R. (1982) Contrasting W-Mo-Cu and W-Sn-F skarn types and related granitoids. *Mining Geology*, v. 32, p. 339-351.
- Meinert, L.D. (1989) Gold skarn deposits-geology and exploration criteria. *Economic Geology Monograph* 6, p. 537-552.
- Meinert, L.D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada*, v. 19, p. 145-162.
- Meinert, L.D. (1995) Compositional variation of igneous rocks associated with skarn deposits - Chemical evidence for a genetic connection between petrogenesis and mineralization. in Thompson, J.F.H., ed., *Magma, fluids, and ore deposits*, *Min. Assoc. Can. Short Course Series*, v. 23, p. 401-418.
- Meinert, L.D. (1997) Application of skarn deposit zonation models to mineral exploration. *Exploration and Mining Geology*, v. 6, p. 185-208.
- Meinert, L.D. (1998) A review of skarn that contain gold. *Mineralogical Association of Canada Short Course Series*, v. 26, p. 359-414.
- Meinert, L.D. (2000) Gold in skarns related to epizonal intrusions: *Reviews in Economic Geology*, v. 13, p. 347-375.
- Meinert, L.D., Dipple, G. M. and Nicolescu, S. (2005) *World Skarn Deposits. Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA, p. 299-336.
- Moon, K.J. (1991) Review of skarn ore deposits at the southern limb of the Baegunsan Syncline in the Taebaek Basin of South Korea. *Jour. Geol. Soc. Korea*, v. 27, p. 271-292.
- Myers, G.D. and Meinert, L.D. (1991) Alteration, mineralization, and gold distribution in the Fortitude gold skarn. in Raines, G.L., Lisle, R.E., Schafer, R.W., and Wilkinson, W.H. eds., *Geology and ore deposits of the Great Basin: Reno*, Geological Society of Nevada, v. 1, p. 407-418.
- Nweberry, R.J. (1987) Use of intrusive and clac-silicate compositional data to distinguish contrasting skarn types in the Darwin polymetallic skarn district, California, USA. *Mineralium Deposita*, v. 22, p. 207-215.
- Park, H.I., Chang, H.W. and Jin, M.S. (1988) K-Ar ages of mineral deposits in the Taebaek mountain district. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 21, p. 57-67.
- Ray, G.E. and Dawson, G.L. (1987) Geology and mineral occurrences in the Hedley gold camp. *British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources Open File Map 1987-10.*
- Ray, G.E. and Dawson, G.L. (1988) Geology and mineral occurrences in the Hedley gold camp. *British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources Open File Map 1988-6.*
- Ray, G.E. and Dawson, G.L. (1994) The geology and mineral occurrences in the Hedley gold camp. *British Columbia Ministry of Energy, Mines and Petroleum Resources Bulletin* 87, 156p.
- Ray, G.E., Dawson, G.L. and Webster, I.C.L. (1996) The stratigraphy of the Nicola Group in the Hedley district, British Columbia and the chemistry of its intrusions and Au skarns. *Canadian Journal of Earth Science*, v. 33, p. 1105-1126.
- Theodore, T.G., Orris, G.J., Hammarstrom, J.M. and Bliss, J.D. (1991) Gold-bearing skarns: *U.S. Geological Survey Bulletin* 1930, 61p.
- Tooth, B., Brugger, J., Ciobanu, L. and Liu, W. (2008) Modeling of gold scavenging by bismuth melts coexisting with hydrothermal fluids. *Geology*, v. 36, p. 815-818.
- Yun, H.S. (1986) Petrochemical study on the Cretaceous granitic rocks in the southern area of Hambae Basin. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 19, p. 175-191.
- Yun, S.G. (1983) Skarn-ore associations and phase equilibria in the Yeonhwa-Keodo mines, Korea. *Jour. Korean Inst. Mining Geol.*, v. 16, p. 1-10.
- Zharikov, V.A. (1970) Skarns. *International Geology Review*, v. 12, p. 541-559, p. 619-647, and p. 760-775.